産業資材用繊維の性能* (1)

高速度用タイヤコード

会 員 藤 本 枝 太**

1. 緒 言

本報は主として産業用に大量に使用されている繊維として、これまであまり関心の払われていなかったと思われる事項について検討するもので、従来の実績から考察し、さらに来るべき将来に処すべく待機の姿勢をとろうとするものである。

交通機関の増加、さらに速度の上昇は、物質文明における時間の短縮として必要欠くべからざる要件であるが、同時にその高速度に耐え得る十分なる設備および安全が確保されなくてはならない。

これまで大した問題を起こさないうで使用されてきたという理由から、将来高速度においてもそのまま使用に耐えるだろうとの類推は、必ずしも当てはまらない場合が多い。

このような見地から産業用資材繊維のうち、タイヤまたはベルトに大量に使用されているタイヤコードの性能について私見を述べてみたい。

したがってその目的とするところは、将来に処しての向上発展、改良されるべき物性または新規な用途開発などに対し何らかの示唆の得られることを期待するものである。

2. タイヤコードの疲労性

タイヤまたはベルトにおいて、これらを構成しているコードの破壊現象については、すでに本誌において私見を述べたとおり、一般に繰り返しかけられる外力による疲労現象のため、コード引張り強力¹⁻¹⁾の低下によって説明されている。しかし現実には運転中において大幅の伸張(〜数%)がおこると思われる部分よりも、むしろ圧縮

または屈曲がおこることと思われる部分におけるコードの破壊が優先しておこる場合が多い。

2.1 屈曲疲労

タイヤが走行中に与えられる変形についてはすでに多くの報告があるが¹⁻²⁾、大体の形態を第1・1図に示す。(a)はチューブに圧搾空気を入れた状態におけるタイヤの横断面で(点線はチューブを示す)、(b)はこれに荷重が

(第1・1図) タイヤの横断面の変形状態

かかった場合の変形状態で、屈曲部における鎖線は中立線を示す。(c)は(b)の屈曲部の拡大図で、鎖線で示された中立線の内側のコードのある部分の圧縮(*s*で示す)と外側のコードのある部分の伸張(*p*で示す)の分布の状態を示す。これらの変形はそのままコードの変形として与えられるものと見なされる。(コードはタイヤの軸に対して普通交互に40~45°の方向に入っている)

*s*および*p*で示される部分における静的な圧縮および伸張変形は、条件によっても異なるが普通両者とも数%, ときには10%以上にも達するデータもみられている。

この圧縮および伸張は、タイヤが走行中土地に接したときに起るもので、タイヤの回転とともに繰り返される。この変形の繰り返しはコードの疲労を起こす原因となる。

荷重時の変形がコードに疲労を与えるものとするれば、

* Some Aspects on Industrial Fiber Properties.
(1) High Speed Tirecord

** S. Fujimoto, Member. 帝人繊維加工研究所

第1・1図(c)における中立線の内側および外側の部分の変形は、主としてコードの圧縮（この場合単繊維は屈曲される）および伸張と考えられることから、それぞれの部分に適合する耐疲労性のすぐれたコードの選択的な使用が合理的である。すなわちタイヤの内層は圧縮（または屈曲）疲労に対して、外層部は伸張疲労に対して強いコードを使い分けすべきである。

屈曲疲労に対し強いコードとしては、原糸としては適当な Relaxation を与えた繊維、またコードとしては撚の大きい方が効果的である¹⁻³⁾。これに反し伸張疲労に強いコードとしては、十分な延伸処理と、撚数の少ないコードが適当と考えられる。

繊維に与えられる Relaxation は、主としてある程度の収縮を伴った熱処理または液体による膨潤処理などによって行なわれる。Relaxation の機構についてはまだ十分説明がなされていないが、結果的には弾性限界強度（または伸度）の増大、動的粘弾性における損失の低下、微細構造の安定化（エントロピーの増大）、緩衝作用の増大、分子鎖間の結合力の増大などいろいろな見方がなされる。

これらの現象のうち、どれがどのような機構によって屈曲および伸張疲労性に貢献するかについての定説はなく、将来の興味ある研究問題として残されている。

2.2 動的屈曲破壊

コードが動的屈曲を伴った場合の見かけの引張強度は、屈曲半径の小さいほど、および屈曲角速度の大きいほど¹⁻¹⁾強力¹⁻⁵⁾の低下が大きくなる。

後方 側面

(第1・2図) 高速度走行中のタイヤの変形状態

第1・2図はタイヤの走行中、土地に接した部分の変形（第1・1図に示す）が高速度回転下において発生した振動的変形の定常状態を示す。この写真*からわかることは、タイヤの1回転に1回の変形（厳密には接地と分離の2回）のみならず、数回の繰り返しのみられること

である。この変形時にはコードには高速度の屈曲が与えられることは容易に了解される。

いま自動車が100km/hrの速度で走行している場合について計算すれば、タイヤの定常状態の変形においては、その周期は大体0.01secのオーダになる。すなわち1/100 secの周期において屈曲が繰り返されることになる。

第1・3図は、自由に回転するピンによって単繊維に

(第1・3図) 動的屈曲の説明図

屈曲を与える場合の説明図である。(a)は半径Rをもったピンに半径rの断面円形の繊維に張力 T_1 および T_2 がかけられた状態で、矢印の方向に移動しているものとする。円弧状に曲げられた繊維は、鎖線で示す中立線を境として外側および内側においてはそれぞれ伸張、圧縮の起こることは説明するまでもない。（以下便宜上外側の伸張についてのみ取り扱う）

屈曲によって発生する変形量 ε は、角 θ に関係なく

$$\varepsilon = \frac{R+r}{R+r} = \frac{R+2r}{R+r} \dots\dots\dots (1-1)$$

で表わされる。この変形量 ε は繊維のヤング率Eによってそのまま応力 σ に変換される。

$$\sigma = \varepsilon E \dots\dots\dots (1-2)$$

この σ は、繊維にすでにかけられている張力（断面に均一に分布している張力）に付加され、繊維のもつ強力（または伸度）を超過した部分から破壊が発生し、これが断面方向に進行し繊維は切断する。

σ はピンのRが小さく、繊維のrの大きく、またヤング率Eの大きいほど大きくなり、その結果見かけの張力の低下は大きくなる。

繊維の屈曲によって発生する σ は、第3図(b)に示されるように時間の経過とともに長さ方向（屈曲点よりlおよび θ 方向）に緩和するが、その距離xは大体2~5rに達するといわれている¹⁻⁵⁾。

点における屈曲がもしきわめて短時間（または高速度）に行なわれた場合には、いまのところ推論の域を出ないが、点においては発生する熱量とともに応力 σ の

* BSタイヤ会社の提供

緩和距離は少なく、温度および σ の長さ方向における分布の傾斜は急となり破壊の原因の1つと考えられる。しかし高速度回転による温度上昇、遠心力の増大による破壊原因を見落してはならない。したがって繊維の移動速度の大きいほどまたタイヤの回転速度の大きいほど繊維またはコードの見かけの強度低下は大きくなる¹⁻¹⁾。

このことはタイヤまたはベルトなどの運転速度の上昇に伴って、加速度的に破壊の増加を暗示するものである。

動的屈曲下におけるコードの破壊現象は、屈曲の瞬間的現象としての温度上昇および応力の偏在が、繊維間の摩擦力、撚構造または繊維自体の粘弾性などによって支配されることはひとまず説明されるが、本質的には高分子の主鎖結合およびその Elexibility、分子鎖間の二次結合、さらに分子配向度結晶性など繊維の微細構造とともにその材質によっても支配されるべき性質のものと考えられる。

以上の点から繊維の動的物性の必要性がクローズアップされ、動的試験の広範な実施が期待される。

2.3 Merged Fiber

タイヤコードに要望される性質はきわめて多く、これらの性質を単に一種の繊維をもって特定の処理、加工などによってなし得られる範囲は自ら限界がある。

ある繊維についてみれば、その固有の各種の物性はそれぞれ潜在的なある相関をもっており、必要な数種の物性を同時に希望する方向に進めることはきわめて困難なことは多くの経験から了解される。

潜在的なこれらの物性間における相関を調節し、あるいは離脱することが将来の研究の一つの方向かも知れないが大きい困難な問題である。

最近のニュースによれば、互いに長所を保持し、欠点

を補う目的で異なった物性をもつ2つの繊維を組合わすことによって作られた Merged Fiber^{1,7}なるものがある。これは単一の繊維で具備できない必要な性質を、異なった繊維の組合せによって得られたもので、この意味においては繊維業界において新しい境地を開拓する緒といえる。Merged Fiberの主目的はフラット スポット(後述)の改善、および耐疲労性の向上にあるらしく、レーヨン、ナイロン、ガラスおよびノメックスいずれも単独の場合よりも Merged Fiberの方が改善されている。そのデータの一部を第1・1表に示す。

異なった物性をもつ2つの繊維を組合わした場合の合成特性についてはすでに報告されているが、普通は並列に組合わされることになり、その合成された物性は然の影響の入らない場合一般につぎのように表現される。

- i) 合成ヤング率は両繊維のそれぞれのヤング率および分率によって計算される。
- ii) 引張り強さは分率による両繊維の合計になるが、そのオプチマム強さは伸度の小さい方の繊維に支配される。
- iii) したがって両繊維の組合わせによって最大の強さを得るためには両繊維の切断伸度を等しくする。
- iv) もし等しくない伸度を持つ場合には伸度の差だけ弛んだ状態において組合わすことによって、両繊維が同時に切断するようにする。
- v) したがって異なった伸度をもつ両繊維の組合わせにおいては、ヤング率および強度はいずれかの犠牲は止むを得ず、両者とも最高の増大は期待されない。

これらの各々の場合における状態についてつぎに説明する。

- i) の組合わせによって得られる合成ヤング率 E は

(第1・1表) Merged Fiber の 性 能

繊維の種類	構成	見かけの強度 (g/d)	疲労回数 ($\times 10^3$)	コード応力 (lb)	フラットスポット 指数
ポリエステル	1 000D/2本	7.3	500	9.5	0.35
レーヨン	1 650/2	4.1	290	17.7	0.40
レーヨン/ポリエステル	1 650/1 000	5.0	410	11.4	0.35
ナイロン	840/2	7.3	500	3.3	0.90
ナイロン/ポリエステル	840/1 000	7.0	520	6.8	0.50
ガラス	1 520/2	9.1	50	40.0	0
ガラス/ポリエステル	3 040/2 000	6.0	150	14.0	0.1
ノメックス	1 200/2	5.8	400	4.2	0.38
ノメックス/ポリエステル	1 200/1 000	6.5	450	10.0	0.35

著者注) 1. コード応力は5%伸度における荷重と思われる

2. ノメックスはデュボン社製のHT-1と呼ばれた耐熱性ナイロン

(この場合並列組合せとなる)

$$E_p = E_1(x) + E_2(1-x) \quad \dots\dots\dots (1-3)$$

E_1, E_2 はそれぞれの もつヤング率で, x は分率である.

もし 2 つの繊維が直列に組合わさった場合には

$$E_s = \left(\frac{y}{E_1} + \frac{1-y}{E_2} \right)^{-1} \quad \dots\dots\dots (1-4)$$

で表わされる. y は組合わされた両繊維の長さ方向における分率である.

さらに両者 (並列, 直列) の組合わさった場合の合成ヤング率は一般的に

$$E = \left[E_1(\lambda) + E_2(1-\lambda) + \frac{1-\varphi}{E_2} \right]^{-1} \quad \dots\dots\dots (1-5)$$

で表わされる. λ, φ はそれぞれ並列および直列成分の分率である.

これらの組合わせの関係をまとめて第 1・4 図に示す.

(第 1・4 図) 2 種類組合わせの合成ヤング率

p および s 曲線はそれぞれ (1-3) および (1-4) 式で示されるもので (1-5) 式の場合は λ, φ の値に応じて両曲線の開む内に位置する.

ii) の場合の合成強度は普通並列に組合わされる場合が多いので (1-3) 式によって計算されるが, 切断時の最高強度は第 1・5 図に示されるように分率に関係なく低い方の繊維の伸度支配されることに注目しなければならない. (直列組合わせの場合には弱い方の繊維の強さに支配されることはいうまでもない)

異なった伸度をもつ繊維を合理的に組合わす場合には iv), v) に説明したとおりでこの状態は第 1・6 図に示す.

N, T はそれぞれナイロン, テトロン の荷重-伸張曲線で, その合成時の強度は燃あわさない場合 $T-N$ 曲線で示されるように 236g の強度を示す. これに対しテトロンを約 16% 弛ませた状態で組合わした合成時の強度は $T'-N$ 曲線で示されるように 284g の強さを示す. な

(第 1・5 図) 並列に組合わした場合の荷重-伸張曲線

(第 1・6 図) テトロン, ナイロン合成荷重-伸張曲線

おこれらの場合の合成ヤング率は前者においては $T-N$ 曲線の傾斜または (1-3) 式から計算され, 後者はナイロンのヤング率の $\frac{1}{2}$ となる. ($T'-N$ 曲線のデニールで計算される) 燃あわされた場合には両繊維間の相互作用によって異なった挙動を示す.

異種繊維組合わせ状態における収縮 (伸張回復) についても興味ある関係があるが別の機会に譲る.

耐疲労性の向上を目的としてなされた場合における疲労は, 伸張, 屈曲, 圧縮, 伸張回復などの現象に対して, 両繊維の挙動の総合的結果として現われ, 簡単に解析できる性質のものではないが, 少なくとも両繊維における疲労が適当なバランス状態で起こるように組合わされるべきだろう.

以上は主として静的挙動について検討したが実際の疲労は動的挙動下における現象で, 時間, 速度, 温度, さらに粘性, 緩和現象などの見地からそれぞれ研究されな

くてはならない。

2.4 Flat Spot

Merged Fiber は第1・1表からわかるように、Flat Spot の改善を目標としてなされたものと思われ、特にナイロンコードにおいてその効果が明確に示されている。

Flat Spot とは自動車の走行当初において、タイヤの回転に伴う振動が起こり、速度を増加した場合これが騒音を発するに至る現象をいうものであるが、この現象は数分後には次第に消滅する性質のものである。

この現象は特にナイロンによって製造されたタイヤにおいて発生するもので、ナイロンコードの大きい欠点として挙げられている。走行後停止したタイヤは走行中に高温になっているナイロンコードによって、タイヤが地面に接触し変形されたままの状態で冷却固定され、つぎの走行当初において変形のまま走行するために起こる現象といわれている。

Flat Spot は直接タイヤを製造し、走行してみなければ正確な試験はできないが、近似的にはコードの状態¹⁻¹⁰⁾で試験されるつぎの方法が提出されており、これは一般の試験室で容易に測定できるものである。

この測定法は要するにタイヤの走行による発熱ならびに冷却時に起こるコードの状態を温度、張力、時間との適当な組合わせによってコードの状態において近似的に再現したもので、冷却後固定された変形量によって評価されるものである。その測定法の要点を手順を追って説明すれば

- 1) 2本の同じ試験コードを150°Fにおいて、それぞれ2lbの荷重を吊下する
- 2) 平衡後1本のコードの荷重を取り除く
- 3) つぎに75°Fまでゆっくり冷却する
- 4) 平衡後ふたたび荷重を吊下し
- 5) 温度を上昇し
- 6) 10 min 後120°Fに達したときの両コードの長さの差を測定し、これを Flat Spot Index とする。

タイヤにおいて実際得られた Flat Spot の量と、実験室で得られた Flat Spot Index との関係は第1・7図に示されるように各種コードとも満足な相関性のみられることから、この測定法の有効性が強調される。

ナイロンコードによって製造されたタイヤは、大量に商品化されているにもかかわらず新車にはほとんど取付けられてなくて、いぜんとしてレーヨン製タイヤが使用されているらしい。このことはナイロン製タイヤは十分なる耐久性はあるが、Flat Spot のため最初新車購入の顧客に対し誤まった評価を与えるおそれのあることから敬遠されたものとみられている。しかしスベアタイヤは大部分ナイロン製タイヤによって占められているこ

(第1・7図) 各種のタイヤコードのフラットスポットの関係

とは、Flat Spot 以外の実質的性能においては、ナイロン製タイヤの優秀性が一般に認められていることを物語っているものであろう。最近ナイロンの分子構造を変えることによって Flat Spot の低下を計る特許もみられる¹⁻¹¹⁾。

2.5 ねじり疲労

タイヤまたはベルト中において起こるコードの疲労は、繰り返し伸張または屈曲によって発生するものといわれているが、現実にはコードに熱が与えられている関係で、単繊維はらせん状態において見かけの伸縮または屈曲が起こる。この場合コードに与えられた伸縮または屈曲変形は、単繊維に対してはいずれの変形においても実際上ねじり変形を伴うことを見逃してはならない。

これまでコードに対する繰り返し伸張または屈曲疲労としての多くの研究がなされ、それぞれの現象からある程度の解析がなされてきた。伸張、屈曲いずれの形式の疲労においても、単繊維は従来の伸張疲労または屈曲疲労とともにねじり疲労が同時に起こっているものとすれば、これら3種類の疲労においていずれが優先的に起こり、また支配的であるかについて検討することが必要で、これらは与えられた疲労条件によって大幅に支配される性格のものである。

繊維に対し特にねじり疲労に関する研究はまだほとんどみられていない。金属におけるねじり疲労の機構をそのまま繊維に適用できるかどうかはわからないが、実験によって繊維にねじり疲労を与えた場合の写真¹⁻⁸図に示す。

5.2dのポリエステルの単繊維に、50回/cmのねじりを繊維の破壊するまで繰り返し交互に与えた場合の破壊端を(a)に示し、その断面の状態を(b)に示す。ねじり疲労の結果繊維軸に対し斜方向のきれつ、および半径方向における放射状のきれつが明瞭に認められる。これは屈曲疲労におけるフィブリル化そのものである。

(a) 側面 (×300) (b) 断面 (×600)

(第1・8図) 繰り返しねじり疲労破
壊したテトロン繊維

ナイロンのモノフィラメントを90°屈曲した状態において、繊維軸を中心に二軸的に回転した場合においても同様な半径方向のき裂の発生がみられている。¹⁻¹²⁾

繊維に屈曲またはねじり方向に力が作用した場合に、一般に繊維軸と45°の方向に働らく剪断応力は軸から遠ざかる(表面に近づく)ほど大きく働くものと考えれば、第1・8図に示されるき裂の生成機構は容易に説明される。

実際タイヤまたはベルト中において起こる繊維の疲労が単繊維に対していずれの変形が支配的であるかは断定できないが、これまでの多くの実験データにおいて、単繊維の開裂またはフィブリル化の多くの現象が見られている。このことは支配的な疲労機構として単繊維の軸方向のき裂の発生、およびその原因として分子鎖間の結合エネルギーによって支配されると思われるねじり剛性率の低下が推察される。

第1・9図は第1・8図に示す実験において、ねじり繰り返しの増加に伴う強度およびねじり剛性率の変化の状態を示したもので、強度の低下よりもねじり剛性率の大幅な低下が認められる。

以上の結果から単繊維の疲労に対しては、ねじり剛性率の見地から新しい研究方向が暗示されるとともに、繊維の微細構造に対しても縦方向のみならず横方向の研究¹⁻¹³⁾の必要性が予想される。

(第1・9図) ねじり変形による物性値の変化

2.6 特殊タイヤ コード

最近特殊タイヤとして、スチールまたはガラス繊維^{1-14, 1-15)}を使用したものが報告されている。

ガラス繊維コードで作られたタイヤの長所としては、強力、耐熱性および耐水性などが挙げられている。ガラスその他特殊繊維コードの特長を発揮するためには、従来の一般のタイヤコードの使用と異なった処方、すなわちコードをタイヤのラジアル方向に使用することが有効で、同時にトレッドの構造も変わり、その結果燃料の消費量が減少し、敏捷な操縦ができるようになったが、^{1-15, 1-16)}残された問題はガラスとゴムの接着性である。

また高速度の飛行機用タイヤは、飛行中または着陸時において450°Fにも達するといわれ、これに対してはガラス繊維コードの表面をシラン系樹脂で処理することによって、ゴムとの接着性を向上しこれらの温度に耐えるタイヤの開発がなされ、飛行機はもちろんのこと高速度自動車用にも進出する見通しが得られたとの報告もみられている。¹⁻¹⁴⁾

スチールコードは、スチールのもつ強さを適当な表面処理によって、ゴムとの接着のよいものはタイヤとしてよい耐熱性を発揮する。さらにこのタイヤの特長としては、タイヤのきしみなく急旋回¹⁻¹⁸⁾のことが挙げられている。

引用文献

- 1-1) 藤本; 本誌, 18, 1, 80; 2, 151; 3, 226 (1965)
- 1-2) たとえばB. Weikert; Text. Res. J., 32, 9, 705 (1962)
- 1-3) 藤本; 本誌, 18, 2, 151 (1965)
- 1-4) 藤本地; 本誌, 17, 9, 667 (1964)
- 1-5) W. J. Hamburger et al; Text. Res. J., 22, 11, 695 (1952)
- 1-6) 鈴木; 高分子化学, 16, 154 (1959); 17, 207 (1960)
- 1-7) Daily News Record, P13 (1965-5)
- 1-8) A. Kemp and J. D. Owen; J. Text. Inst., 46, 11, T684 (1955)
- 1-9) J. D. Owen; J. Text. Inst., 53, 3, T144 (1962)
- 1-10) G. W. Rye and J. E. Martin; Rubb. World, P75 (1963-10)
- 1-11) U. S. Patent, 3220456 (1965)
- 1-12) D. C. Prevorsek and W. J. Lyons; Text. Res. J., 34, 3, 271 (1964)
- 1-13) I. M. Ward; Text. Res. J., 31, 6, 650 (1961)
- 1-14) Chem. and Eng. News, P 48 (1964-6/15)
- 1-15) Skinn. Rec., 37, 11, 984 (1963)
- 1-16) J. B. Wilson; Rubb. Plastics Age, 45, 3, 525 (1964)
- 1-17) E. H. Wallance and W. J. Milligan; Rubb. World, 152, 6, 73 (1965)
- 1-18) D. C. Miles; Rubb. Plastics Age, 45, 3, 521 (1964)

◁ 次回は「衝撃緩衝用繊維」▷